

基于 ISA 总线和 RS-485 网络的高温超导磁储能监控系统

王学军, 彭晓涛, 程时杰, 王少荣, 谷双魁, 唐跃进
(华中科技大学 电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 提出了一套基于工业标准体系结构(ISA)总线和 RS-485 网络的高温超导磁储能(SMES)监控系统。介绍了系统的通信协议,描述了系统的总体结构及主要功能。为提高系统的实时响应性能和数字信号处理能力,在硬件上采用了数字信号处理器(DSP)技术;采用模块化的程序设计方法,同时通过利用 DSP 的中断资源,解决了多任务对 CPU 的同时请求以及交叉的问题。实验表明,该监控装置能对整个 SMES 系统进行有效的状态监测与控制。

关键词: 高温超导磁储能; 监控系统; DSP 控制器; ISA 总线; RS-485

中图分类号: TM 76

文献标识码: B

文章编号: 1006-6047(2006)06-0063-04

0 引言

随着高温超导材料和电力电子技术的快速发展,超导磁储能(SMES)装置开始逐渐应用于电力系统中^[1-2]。由于 SMES 具有损耗低、储能大和响应快的特点,特别是由于全控型电力电子开关器件的应用,使得 SMES 具有独立四象限有功和无功的调节能力,因而可以胜任电网调峰、提供系统备用能量、提高电力系统稳定性、改善电能质量等诸多控制任务^[3-6]。

为了研究高温 SMES 在电力系统中的应用,国内许多科研单位进行了 SMES 系统的研制工作。清华大学和中科院电工所开发了一套 20 kJ/15 kW 的 SMES 试验装置^[7],东南大学和国电自动化研究院联合研制了一台超小型高温 SMES 试验装置^[8]。华中科技大学超导电力科学技术研究中心在国家 863 高技术基金项目的资助下,联合浙江大学等科研单位共同研制高温超导磁储能系统。本文主要介绍 SMES 系统中基于工业标准体系结构(ISA)总线和 RS-485 网络监控装置的研制,该装置充分利用了 TI 公司 TMS320F240 和 TMS320F206 芯片强大的运算能力和外围接口电路,并成功地将 ISA 总线和 RS-485 网络运用于实时数据通信中,使系统具有很强的抗干扰能力和容错能力。

1 结构和主要功能

1.1 总体结构

本监控系统总体结构采用基于 ISA 总线和 RS-485 网络的分布式模块化结构。ISA 总线的数据宽度为 16 bit,工作频率为 8 MHz,最大数据传输速率为 16 Mbit/s,适用于 8 bit 及 16 bit 微处理器^[9],在电

力行业中得到了很大的发展和应用。RS-485 采用差动发送/接收,共模抑制比高,抗干扰能力强;传输距离远,传输速率高,可达 10 Mbit/s,能实现多点对多点的通信^[9]。因此,将 ISA 总线和 RS-485 网络结合可以使整个监控系统具有很好的可靠性、实时性和开放性。

系统结构如图 1 所示。

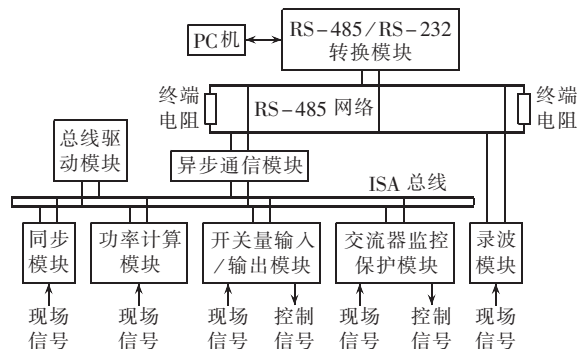


图 1 监控系统结构

Fig.1 Structure of monitoring and control system

由图 1 可见,整个系统由 2 层网络组成。第 1 层网络是由 ISA 总线及其相关的状态量采集及控制模块构成,由于工控机对环境的适应性好、抗干扰能力强、采用模块化设计易于进行功能扩展且内置有 ISA 总线,因此第 1 层网络主要是在工控机箱内实现的。将总线驱动、同步、功率计算、开关量输入/输出、变流器监控保护、异步通信等模块按照系统实际测量容量要求制成插件板,插入工控机箱的 ISA 槽内即可组成第 1 层网络。该监控系统需要测量的状态量不多,可以将实现第 1 层网络的插件板插入一个机箱中。当需要的插件板很多时,可按照文献^[10]中内存映射的方法将插件板分布于多个机箱中。

用双绞线组成的 RS-485 网络是第 2 层网络的

主体。全双工的 RS-485 网络可以使录波模块与异步通信模块在和 PC 上位机的数据帧、命令帧的交换过程中互不冲突。

1.2 主要功能

1.2.1 实时监测关键节点的状态量

系统可实时监测关键节点的电压、电流、功率、开关状态及系统频率。现场信号经过同步模块的模/数转换电路形成一系列的脉冲信号作为第 1 层网络的同步工作节拍(约 20 ms)。第 1 层网络的各个状态监测模块在每个工作节拍的开始完成从模拟量检测到数字信号处理的任务,并计算出关键节点的状态量,按照一定的数据格式组成一个数据报存在各模块板的双口 RAM 中,该处理过程不超过 100 μ s。

总线驱动模块作为第 1 层网络的核心,对 ISA 总线具有绝对唯一的控制权,它在每个工作节拍中通过 ISA 总线搜集各状态检测模块双口 RAM 中的数据报,对其经过约定格式的处理后形成一条数据帧存于异步通信模块的双口 RAM 中。PC 上位机每隔一段时间向异步通信模块发出一条查询命令帧,读取其双口 RAM 中的数据帧并显示在 Windows 图形用户界面上。从 1 个工作节拍的开始到 PC 上位机显示状态量的时间不超过 20 ms,因此该监控系统能保证监测关键节点状态量的实时性。

1.2.2 控制平台

系统拥有完成各种复杂的高速、高精度控制策略的控制平台。图 1 中的变流器监控保护模块作为 SMES 装置的控制器采用 16 位定点数字信号处理器(DSP)TMS320F 206,该模块通过光纤与 SMES 变流器进行通信与控制。当上位机发出针对变流器的控制命令后,总线驱动模块从异步通信模块获取该命令,寻址变流器监控保护模块,并将该命令写入该模块双口 RAM 的命令缓冲区,然后通过光纤将该条命令下达给变流器,实现了转发上位机各种控制命令的功能。

当电力系统发生故障时,总线驱动模块每个周期读取相关节点的状态,将其写入变流器监控保护模块双口 RAM 的状态缓冲区,根据这些状态信息,变流器监控保护模块采用高速、高精度的算法计算出电力系统需要的有功和无功功率,通过光纤将计算出的指令有功、无功功率下达给变流器,变流器按照指令控制磁体能量的吸收与释放,从而保证电力系统在故障时仍能通过 SMES 维持电力系统稳定运行。

1.2.3 录波及失超保护

图 1 中的录波模块通过 RS-485 网络与 PC 上位机相联。当需要对 SMES 系统进行录波时,上位机向录波模块发送录波命令,录波模块收到该命令后启动录波将数据存于模块本身的外部 RAM 中。录波结束后该模块收到传输录波数据命令将存于外部 RAM 的数据传到上位机显示录波波形。

SMES 系统有可能因过大的短路电流或电磁机械应力的作用而失超,因而有必要对 SMES 系统进行失超保护。当图 1 中的变流器监控保护模块检测到失超信号后立即向 SMES 系统发出停机命令,从检测到失超信号到发出停机命令不超过 1 ms,从而保护整个系统。

2 通信实现

本节只介绍异步通信模块与上位机通信的实现,录波模块通信部分的结构与异步通信模块相似,通过 RS-485 网络与 PC 上位机相联。通信协议的作用是为了保证在不太可靠的物理链路上实现可靠的数据传输,其主要功能有帧同步、透明传输、差错控制等。有必要先说明异步通信模块的工作特点,因为它在很大程度上影响了通信协议的实现。每个工作节拍下异步通信模块与上位机的数据帧交换必须在 10 ms 内完成,对于这样的速率等级,简单廉价的 RS-485 双绞线在短距离内仍可满足要求。根据实际情况,没有使用异步通信控制器,而是直接采用 DSP 控制器完成所有的工作。通信接口芯片采用 MAX1490B, DSP 控制器则采用 TI 生产的 TMS320F 206。TMS320F 206 是一款应用广泛的 DSP,它自带的异步串行口可实现与串行设备的无缝连接,可以通过起始位实现比特同步。图 2 是所开发的异步通信模块的硬件构成。

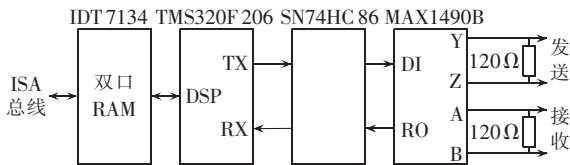


图 2 异步通信模块结构示意图

Fig.2 Structure of asynchronous communication module

从图 2 可以看出,异步通信模块可以工作在全双工方式。另外需要说明的是异步通信模块接收/发送缓冲区的设计。一般,缓冲区应该是一个 FIFO 队列,主机应该能对队列的顶部进行操作,但由于异步通信模块的首要任务是尽可能快地实现数据交换,使用由软件处理的串行缓冲区将增加大量的处理时延,因此实际采用的缓冲区是并行的。异步通信模块的双口 RAM 被对等地分为发送和接收 2 部分,每部分又被均匀地分为若干块子缓冲区,每块子缓冲区可以容纳 1 帧数据,并具有独立的握手标志(作用是防止双口 RAM 的读写访问冲突并标志数据的新旧)。数据交换就直接在这些子缓冲区上进行。发送部分是单缓冲的,接收部分是双缓冲——增加了 1 个 DSP 片内接收缓冲区以防止总线驱动模块没有及时读取数据而导致帧丢失。

通信协议中的帧结构如下:

报头 (7E E7 7EH)	源地址 (1Byte)	目的地址 (1Byte)	报文类型 (1Byte)	数据长度 (1Byte)	数据 (NByte)	异或、累 加校验 (2Byte)	报尾 (0DH)
----------------------	----------------	-----------------	-----------------	-----------------	---------------	------------------------	-------------

由于比特同步已经由硬件实现,数据报的报头仅用于帧同步,传输透明,不需要额外处理。优良的物理链路使得系统仅需要简单的校验方式,在实际中为了尽量减少处理延时,不能将 CPU 时间过多地花费在 CRC 循环冗余上。此外,数据帧和命令帧分开,这可以通过帧结构中的报文类型区分。

本系统采用问答式通信方式,PC 上位机通过向下位机发出查询命令以问答的方式召集存在异步通信模块双口 RAM 发送缓冲区的数据帧,并以此刷新上位机的数据库。图 3 体现了异步通信模块这种问答式的通信方式。

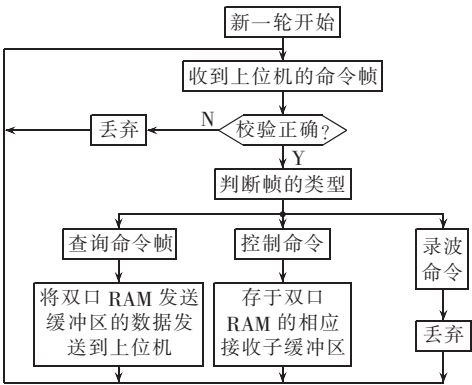


图 3 通信流程
Fig.3 Flowchart of communication

3 系统软件设计

以功率计算模块为例介绍系统的软件设计,由 TMS320F 240 程序实现关键节点处电压、电流、功率计算,程序设计流程如图 4 所示,软件设计主要包括信号检测部分和功率计算的算法实现部分。

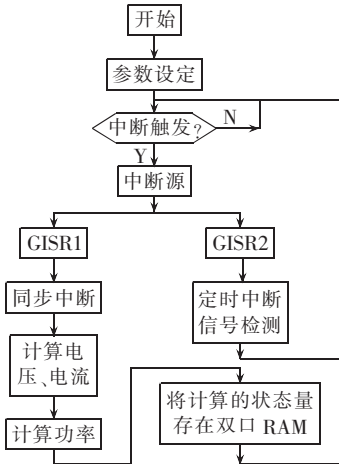


图 4 软件设计流程
Fig.4 Flowchart of software design

3.1 信号检测部分

将关键节点处的三相电压、电流经过电压互感

器和电流互感器降为 DSP 允许输入电压、电流的最大值以下。然后,在 1 个工作节拍内对降压后的电压、电流值等间隔采样 16 点,实现电压、电流信号的检测。

3.2 功率计算的算法实现部分

在每个工作节拍开始后,利用傅里叶算法分析信号检测部分的采样值,得到电压、电流相量的实部和虚部,按照式(1)(2)进行计算即可得到该节点的有功功率和无功功率。

$$P=U_{Ai}I_{Ar}+U_{Ai}I_{Ai}+U_{Br}I_{Br}+U_{Bi}I_{Bi}+U_{Cr}I_{Cr}+U_{Ci}I_{Ci} \tag{1}$$

$$Q=U_{Ai}I_{Ar}-U_{Ar}I_{Ai}+U_{Bi}I_{Br}-U_{Br}I_{Bi}+U_{Ci}I_{Cr}-U_{Cr}I_{Ci} \tag{2}$$

为提高处理器的资源利用率和系统实时处理能力,功率计算模块充分利用了 TMS320F 240 的中断资源。参数设定模块包括外部电压、电流互感器的变比以及该模块的地址。该程序在每个工作节拍内将电压、电流、有功功率、无功功率的计算值保存在功率计算模块的相应数据存储区。

4 技术性能

经过试验和数据记录,该监控系统达到了如下技术性能指标。RS-485 网络最多允许平衡电缆上连接 32 个发送器/接收器对,通信可靠,与 PC 上位机的通信速率为 57.6 Kbit/s。通信协议采用问答式,本系统采用的通信协议都是透明的,可以根据响应的要求进行相应的改动。开关量输入模块可以采样 16 路开关量,开关量输出模块可以控制 8 路开关量输出。功率计算模块能够计算 3 个关键节点的电压、电流及有功、无功值。录波模块能实现 2 min 19 路电气量的录波功能。

以标准校验仪表为参考对象,对发电机机端电力参数测量效果进行了对比测试,摘录 3 组测量数据如表 1 所示,系统的相位角 $\varphi=37^\circ$ 。

表 1 测量结果对比

Tab.1 Comparison of measured results

组号	类别	U_a/V	I_a/A	P/W	Q/var	f/Hz
1	真值	199.96	17.85	8 580.64	6 434.42	49.98
	测量值	200.02	17.87	8 573.70	6 423.57	50.00
2	真值	211.24	19.01	9 530.56	7 148.56	50.00
	测量值	209.18	18.98	9 517.67	7 159.97	50.01
3	真值	225.17	20.45	11 115.20	8 335.71	49.99
	测量值	226.21	20.47	11 128.24	8 323.91	50.01

发电机机端电力参数的测量范围为 0~230 V, 0~21.65 A。从测得的数据可以看出电压有效值测量的最大误差为 0.3%,电流有效值的最大测量误差为 1.5%,有功功率的最大测量误差为 0.136%,无功功率的最大测量误差为 0.164%,系统频率的采样精度可达 0.04%,因此系统的测量精度完全达到了试验的要求。

5 结语

本文将 TMS320F206 和 TMS320F240 用于高温超导磁储能监控系统的研制中,充分利用了 DSP 强大的运算能力和丰富的外围接口电路,采用比较先进的软件编程技术,成功地开发出一套 SMES 监控系统。同时,将 ISA 总线和 RS-485 网络引入到现场数据的传输中,从而提高了系统的可靠性和容错能力。整个软件和硬件的设计充分考虑了系统的可靠性和可扩展性。该监控系统集多种功能于一体,具有精度高、实时性强、人机接口友好等特点,为研究 SMES 在电力系统中的应用提供了一套很好的监控平台。

参考文献:

- [1] BUCKLES W, HASENZAH W V. Superconducting magnetic energy storage[J]. IEEE Power Engineering Review, 2000, 20(5): 16-20.
- [2] LUONGO C A. Superconducting storage system; an overview[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1996, 32(4): 2214-2223.
- [3] 李艳,程时杰,潘垣,等. 电压源型超导磁储能装置特性的全时域仿真研究[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(18): 30-35.
LI Yan, CHENG Shi-jie, PAN Yuan, et al. Time domain simulation of the characteristics for a voltage source converter fed SMES[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(18): 30-35.
- [4] 彭晓涛,程时杰,王少荣,等. 非线性 PID 控制器在超导磁储能装置的应用[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(11): 62-66.
PENG Xiao-tao, CHENG Shi-jie, WANG Shao-rong, et al. Application of nonlinear PID controller in superconducting magnetic energy storage[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(11): 62-66.
- [5] 李艳,程时杰,潘垣. 超导磁储能系统的自适应单神经元控制[J]. 电网技术, 2005, 29(20): 57-61.
LI Yan, CHENG Shi-jie, PAN Yuan. Adaptive single neuron based control for superconducting magnetic energy storage unit[J]. Power System Technology, 2005, 29(20): 57-61.

- [6] 姚涛,石晶,唐跃进,等. 基于 DRNN 的超导磁储能装置自适应 PID 控制[J]. 继电器, 2005, 33(17): 27-31.
YAO Tao, SHI Jing, TANG Yue-jin, et al. Adaptive PID control based on DRNN for SMES[J]. Relay, 2005, 33(17): 27-31.
- [7] 蒋晓华,褚旭,吴学智,等. 20 kJ/15 kW 可控超导储能试验装置[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(4): 88-91.
JIANG Xiao-hua, CHU Xu, WU Xue-zhi, et al. A 20 kJ/15 kW SMES system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(4): 88-91.
- [8] 陆广香,沈国荣,郑玉平,等. 高温超导储能实验装置研究[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(11): 87-89.
LU Guang-xiang, SHEN Guo-rong, ZHENG Yu-ping, et al. Study on high temperature SMES experimentation equipment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(11): 87-89.
- [9] 刘乐善. 微型计算机接口技术及应用[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1999.
- [10] 李刚,王少荣,程时杰. 一种监控系统实时数据同步交换的新方法[J]. 继电器, 2004, 32(12): 51-54.

LI Gang, WANG Shao-rong, CHENG Shi-jie. Realization of a new synchronous exchange for real-time data in an industrial monitoring and control system[J]. Relay, 2004, 32(12): 51-54.

(责任编辑: 李育燕)

作者简介:

王学军(1980-),男,山东威海人,硕士研究生,研究方向为超导磁储能装置在电力系统中运行与控制(E-mail: wxjwto@eyou.com);

彭晓涛(1971-),男,湖北武汉人,博士研究生,研究方向为超导磁储能装置在电力系统中运行与控制;

程时杰(1945-),男,湖北武汉人,教授,博士研究生导师,IEEE 高级会员,研究方向为电力系统的运行与控制、人工智能在电力系统中的应用及低压电力网载波通信;

王少荣(1960-),男,浙江金华人,副教授,研究方向为电力系统的运行与控制;

谷双魁(1980-),男,河北唐山人,硕士研究生,研究方向为超导磁储能装置在电力系统中运行与控制;

唐跃进(1958-),男,湖南石门人,教授,博士研究生导师,研究方向为超导电力。

High temperature SMES monitoring and control system based on ISA bus and RS-485 network

WANG Xue-jun, PENG Xiao-tao, CHENG Shi-jie,
WANG Shao-rong, GU Shuang-kui, TANG Yue-jin
(Huazhong University of Science and Technology,
Wuhan 430074, China)

Abstract: A high temperature SMES (Superconducting Magnetic Energy Storage) monitoring and control system based on the ISA (Industry Standard Architecture) bus and the RS-485 network is presented. The system communication protocol is introduced, and the system structure and functions are described. The DSP (Digital Signal Processor) is adopted in the hardware design to enhance the performance of real-time response and digital signal processing. Modularized programs are developed in the software design. Interruption resources of DSP are fully utilized to implement simultaneous requests of multiple tasks for the central processing unit. Experiments show that the system can effectively monitor and control the SMES system.

This project is supported by the High-Tech Research and Development Program of China (2002AA306331).

Key words: high temperature SMES; monitoring and control system; DSP-based controller; ISA bus; RS-485